
MOBILITE ET PHYTODISPONIBILITE DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES SOLS DE LA REUNION

Rapport de synthèse en vue d'une demande de dérogation
sur le critère « éléments traces métalliques »
relativement à l'utilisation d'eaux usées épurées
pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts à La Réunion

Octobre 2015

Matthieu N. Bravin
Emmanuel Doelsch
Frédéric Feder

PREAMBULE

Le présent rapport de synthèse a été rédigé par Matthieu Bravin, Emmanuel Doelsch, et Frédéric Feder, chercheurs dans l'unité Recyclage et risque du Cirad. Cette unité de recherche travaille sur la problématique ETM à La Réunion depuis plus de 10 ans et sur le recyclage des eaux usées épurées (Reuse) depuis 2008.

La présente étude a été commanditée et pilotée par un groupe de travail composé de l'office de l'eau Réunion, de la direction de l'environnement, de l'aménagement et du transport (Deal Réunion), de la direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (Daaf Réunion), et de l'agence de santé Océan indien (ARS OI). L'étude a été financée par l'office de l'eau Réunion dans le cadre d'une convention de recherche développement avec le Cirad.

La présente étude a vocation à favoriser les projets de mise en œuvre de la Reuse dans un objectif d'économie de la ressource en eau dans les secteurs déficitaires à La Réunion. Un état des lieux récent de ces projets a d'ailleurs été réalisé en parallèle de la présente étude (Elofer 2015).

Les auteurs de l'étude souhaitent remercier Virginie van de Kerchove (Chambre d'agriculture de la Réunion) pour la diffusion de documents sur l'analyse des ETM dans les végétaux issus de déchets verts, ainsi que Lionel Le Mézo (Cirad, Unité de recherche Aïda) pour l'analyse spatiale réalisée sur certaines unités de milieu de La Réunion.

SOMMAIRE

RESUME	- 1 -
1. INTRODUCTION GENERALE	- 3 -
2. SYNTHESE DES ACQUIS ET DES LIMITES DE L'ETUDE DE MILIEU DE COLLIN ET DOELSCH (2008)	- 5 -
2.1. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	- 5 -
2.2. PRINCIPAUX RESULTATS	- 6 -
2.3. CONCLUSIONS	- 8 -
3. DONNEES COMPLEMENTAIRES POUR L'EXTENSION DE LA DEROGATION A L'ENSEMBLE DES SOLS DE LA REUNION	- 11 -
3.1. REPRESENTATIVITE DES GAMMES DE CONCENTRATIONS TOTALES EN ETM DANS LES SOLS	- 11 -
3.2. DONNEES COMPLEMENTAIRES SUR LES ETM REpondant AU CADRE DEROGATOIRE	- 12 -
3.3. DONNEES COMPLEMENTAIRES SUR LES ETM HORS DU CADRE DEROGATOIRE	- 13 -
3.4. ETAT DES LIEUX POUR LES 33 UNITES DE MILIEU NON ETUDIEES	- 15 -
3.5. CONCLUSIONS	- 17 -
4. DONNEES COMPLEMENTAIRES POUR L'EXTENSION DE LA DEROGATION A L'ENSEMBLE DES CULTURES ET ESPACES VERTS A LA REUNION	- 19 -
4.1. DONNEES COMPLEMENTAIRES CONCERNANT LES ESPACES VERTS	- 19 -
4.2. DONNEES COMPLEMENTAIRES CONCERNANT LES PLANTES MARAICHIERES ET ARBORICOLES	- 20 -
4.3. DONNEES COMPLEMENTAIRES CONCERNANT LES PLANTES PRAIRIALES	- 21 -
4.4. CONCLUSIONS	- 21 -
5. CONCLUSION GENERALE	- 23 -
6. BIBLIOGRAPHIE	- 25 -
7. ANNEXE 1 : LOCALISATION ET NATURE DES 33 UNITES DE MILIEU POUR LESQUELLES AUCUNE DONNEE N'EST DISPONIBLE SUR LES ETM	- 27 -
7.1. UNITES DE MILIEU 1 ET 3	- 27 -
7.2. UNITES DE MILIEU 10 A 12	- 27 -
7.3. UNITES DE MILIEU 21 A 23, 25 ET 26	- 28 -
7.4. UNITE DE MILIEU 27	- 29 -
7.5. UNITES DE MILIEU 38 A 40	- 30 -
7.6. UNITES DE MILIEU 61 ET 65 A 67	- 31 -
7.7. UNITES DE MILIEU 69, 71 ET 73 A 79	- 32 -
7.8. UNITES DE MILIEU 81, 84, 88, 89, 91 ET 92	- 34 -

RESUME

A partir d'une synthèse des acquis et des limites de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) qui a permis l'obtention d'une dérogation au critère ETM pour l'épandage des boues de station d'épuration sur les sols agricoles, **le présent rapport a pour objectif de présenter et d'analyser un ensemble de données complémentaires.** Cette analyse fournit des éléments scientifiques permettant de soutenir de futures demandes de dérogation au critère ETM **pour l'ensemble des sols, des cultures et des espaces verts sur lesquels l'utilisation des eaux issues du traitement des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts (ci-après dénommée Reuse) pourrait être envisagée à La Réunion.**

L'analyse des gammes de concentrations totales en chrome (Cr), cuivre (Cu), et nickel (Ni) obtenues dans trois inventaires complémentaires a montré que les 17 unités de milieu (UM) de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) étaient au moins représentatives de 60 des 93 UM de La Réunion en matière de concentrations totales des sols en ETM. L'analyse de deux jeux de données supplémentaires a permis de montrer que les conclusions de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) concernant la faible mobilité et la faible phytodisponibilité des ETM dans les sols étaient également extensibles à 60 des 93 UM de La Réunion, à l'exception des sols des UM 28, 29, et 48 issus du Piton de la Fournaise. Pour ce qui concerne les 33 UM pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sur les ETM, l'analyse de leur localisation et leur nature géo-morpho-pédologique a permis d'estimer que ces 33 UM présentaient un risque nul à faible d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols, à l'exception des UM 65 et 84 pour lesquelles un risque potentiellement élevé ne peut être exclu.

L'analyse des données complémentaires provenant de mesures de concentration en Cr, Cu, et Ni dans des végétaux issus de déchets verts (représentatifs des espaces verts), dans des plantes maraîchères et arboricoles, ainsi que dans des espèces prairiales conforte les conclusions faites par Collin et Doelsch (2008) sur la canne à sucre, en ne montrant aucune différence de concentrations pour des plantes ayant été cultivées sur des sols présentant des concentrations en ETM inférieures ou supérieures aux seuils définis par l'arrêté du 8 janvier 1998.

Considérés dans leur ensemble, **les résultats de ce rapport de synthèse suggèrent donc que les conclusions formulées par Collin et Doelsch (2008) seraient effectivement extensibles à**

l'ensemble des sols, des cultures, et des espaces verts sur lesquels la Reuse serait susceptible d'être mise en œuvre à La Réunion, à l'exception des sols des UM 28, 29, 48, 65, et 84 issus du Piton de la Fournaise pour lesquels une incertitude subsiste quant à la mobilité et la phytodisponibilité des ETM (Ni en particulier).

1. INTRODUCTION GENERALE

L'autorisation et les prescriptions réglementaires permettant l'utilisation des eaux issues du traitement des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts (ci-après dénommée Reuse) ont été précisées dans l'arrêté du 2 août 2010 (NOR : SASP1013629A). L'article 5 de cet arrêté prévoyait notamment que la Reuse soit interdite *« sur un sol ne respectant pas l'ensemble des valeurs limites figurant au tableau 2 de l'annexe I de l'arrêté du 8 janvier 1998 »* (NOR : ATEE9760538A) fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles. **A La Réunion où les sols sont naturellement riches en chrome (Cr), cuivre (Cu), et nickel (Ni), l'arrêté du 2 août 2010 aurait conduit à interdire la Reuse sur plus de 85 % des sols agricoles** (Doelsch et al. 2006).

Conformément à l'arrêté du 8 janvier 1998, **l'arrêté du 2 août 2010 a été modifié par celui du 25 juin 2014 (NOR : AFSP1410752A), notamment afin de permettre de déroger dans le cadre de la Reuse « aux valeurs du tableau 2 de l'annexe I... sur la base d'études du milieu concerné montrant que les éléments-traces métalliques des sols ne sont pas mobiles ni biodisponibles »**. Un guide technique a été rédigé afin de formaliser la méthodologie devant être suivie pour réaliser ces études de milieu et en analyser les résultats (Ademe et APCA 2005).

A partir de ce guide technique, **Collin et Doelsch (2008) ont réalisé une étude de milieu sur la communauté intercommunale Réunion Est (Cirest)**. Cette étude de milieu a permis de démontrer sur les surfaces cannières de la Cirest que Cr, Cu, et Ni étaient d'origine naturelle et faiblement mobiles dans les sols et que Cr, Cu, et Ni étaient faiblement biodisponibles pour la canne à sucre. La diversité des sols étudiés avait également suggéré que les conclusions de cette étude de milieu pouvaient être étendues à l'ensemble des sols de La Réunion. **Sur la base de cette étude de milieu, des demandes de dérogation aux valeurs du tableau 2 de l'annexe I de l'arrêté du 8 janvier 1998 ont été demandées et obtenues sur différentes localités de La Réunion** (arrêté préfectoral du 15 mars 2013 concernant les boues des stations d'épuration de Saint-Pierre et de l'Entre-Deux ; arrêté préfectoral du 27 février 2014 concernant les boues des stations d'épuration du Grand Prado et des Trois Frères).

Etant donné la similitude du cadre dérogatoire proposé par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour l'épandage des boues et l'arrêté du 25 juin 2014 pour la Reuse, **les demandes de dérogation pour la Reuse pourraient s'appuyer sur l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008)**. Cependant, une

étude de milieu plus récente ciblée sur les sols agricoles du Piton de la Fournaise a mis en évidence des dépassements des seuils pour Ni fixés dans le guide technique pour certains types de sol (Doelsch et al. 2010, cf. 3.3). Ces nouvelles données suggèrent donc que **les sols étudiés sur le territoire de la Cirest pourraient ne pas être complètement représentatifs de l'ensemble des sols de La Réunion.**

D'autre part, l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) n'a étudié la biodisponibilité de Cr, Cu, et Ni sur le terrain que pour la canne à sucre. Ce critère étant indispensable pour Cr et Cu ainsi que pour Ni lorsque sa concentration dans le sol est supérieure à 70 mg kg^{-1} (Ademe et APCA 2005), **les demandes de dérogation ne pourraient donc rigoureusement porter que pour la Reuse sur la canne à sucre. Or, la Reuse est envisagée à La Réunion sur une large diversité de cultures (plantes maraîchères et prairiales) ainsi que sur les espaces verts.**

A partir d'une synthèse des acquis et des limites de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008), le présent rapport a pour objectif de présenter et d'analyser un ensemble de données complémentaires permettant de soutenir de futures demandes de dérogation pour l'ensemble des sols, des cultures et des espaces verts sur lesquels la Reuse pourrait être envisagée à La Réunion.

2. SYNTHÈSE DES ACQUIS ET DES LIMITES DE L'ÉTUDE DE MILIEU DE COLLIN ET DOELSCH (2008)

Cette partie fait la synthèse de la méthodologie utilisée et des principaux résultats obtenus au cours de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) qui est à l'origine des dérogations obtenues à La Réunion pour l'épandage des boues de stations d'épuration sur les sols naturellement riches en éléments traces métalliques (ETM).

2.1. Stratégie d'échantillonnage

L'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) a été réalisée sur la Cirest (Figure 1). Cette zone d'étude présentait notamment l'avantage de couvrir une large diversité des types de sol issus à la fois des matériaux volcaniques du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise. Dans un deuxième temps, le choix a été fait de réduire la zone d'étude aux surfaces sur lesquelles les boues étaient réglementairement (hors problématique ETM) épandables, qui présentaient une pente inférieure à 20 %, et qui étaient cultivées l'année de l'étude en canne à sucre, tout en excluant les surfaces des communes de Salazie et de la plaine des palmistes. Les 59 points d'échantillonnage ont alors été répartis de façon homogène sur les 17 unités de milieu¹ (UM) représentées sur la zone d'étude sélectionnée (Figure 1).

Parmi les 5 domaines géologiques présents à La Réunion, l'échantillonnage réalisé a ainsi permis d'étudier les UM de 3 d'entre eux (formations superficielles et matériaux volcaniques non effondrés du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise), ce qui correspondait à 17 des 93 UM présentes à La Réunion. Les UM non étudiées correspondaient donc soit à des UM issues de matériaux géologiques et de situations morpho-climatiques non représentées sur la zone d'étude, soit à des UM appartenant à 2 domaines géologiques (Cirques et hautes altitudes) présents sur la Cirest mais non couverts par la zone d'étude.

L'origine naturelle des ETM dans les sols a été étudiée à partir de la détermination des concentrations totales en ETM dans les 59 échantillons de sol. Le critère de mobilité a été étudié à partir de la détermination de la concentration en ETM dans les extractions au chlorure de calcium² (CaCl₂) réalisées sur chacun des 59 échantillons de sol. Le critère de phytodisponibilité a

¹ Pour Raunet (1991), une unité de milieu est définie par un matériau donné, soumis à un climat donné, affecté d'un modelé particulier, sur lequel s'est formé un sol spécifique couvert lui-même par une végétation caractéristique et affecté d'un certain fonctionnement hydrologique.

² Les concepts scientifiques sous-jacents et le protocole analytique suivi pour la réalisation de cette extraction sont détaillés dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005) ainsi que dans l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008).

été premièrement étudié à partir de la détermination de la concentration en ETM dans les extractions au nitrate d'ammonium³ (NH₄NO₃) réalisées sur chacun des 59 échantillons de sol. Conformément aux suggestions faites dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005), le critère de phytodisponibilité a été secondairement étudié sur le terrain à partir de la détermination des concentrations en ETM dans le jus et la bagasse de cannes à sucre prélevées sur 50 des 59 points d'échantillonnage.

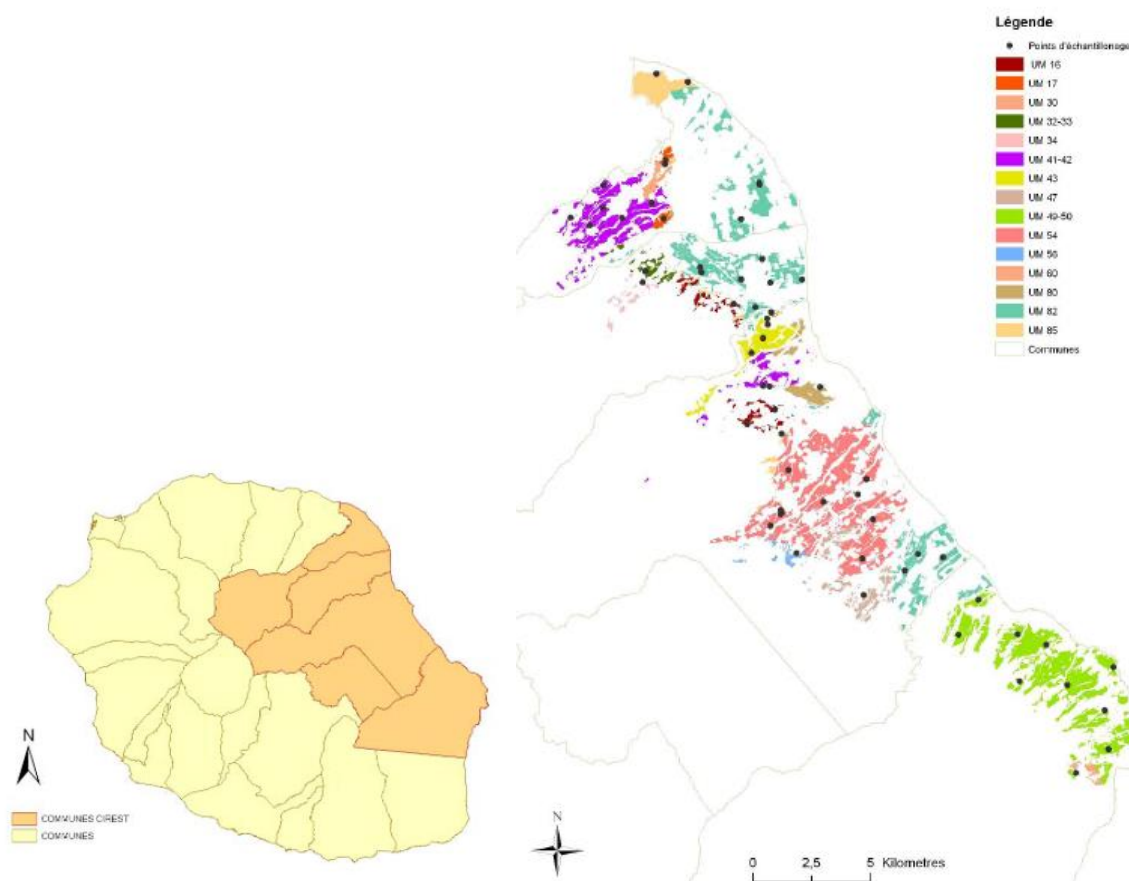


Figure 1. Localisation de la Cirest à la Réunion (à gauche) sur laquelle l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) a été réalisée et des unités de milieu (UM) couvertes par les points d'échantillonnage réalisés (à droite)

2.2. Principaux résultats

La comparaison des concentrations totales en ETM des sols de l'inventaire fait en 2004 (Doelsch et al. 2006) et de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) ont permis de montrer que les concentrations élevées en Cr, Cu, Ni, et Zn étaient d'origine naturelle et que les données de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) étaient représentatives des concentrations observées pour l'ensemble de La Réunion (Figure 2). L'étude de Collin et Doelsch (2008) a également montré que le seuil réglementaire fixé par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour la concentration totale des sols en Zn n'était dépassé que pour 1 des 59 échantillons étudiés,

³ Idem note précédente

échantillon qui correspondait à un site contaminé. En comparaison, les concentrations totales des sols en Cr, Cu, et Ni dépassaient respectivement les seuils fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour 78, 15, et 88 % des 59 échantillons étudiés. Il a donc été conclu que la dérogation ne pouvait porter que sur Cr, Cu, et Ni.

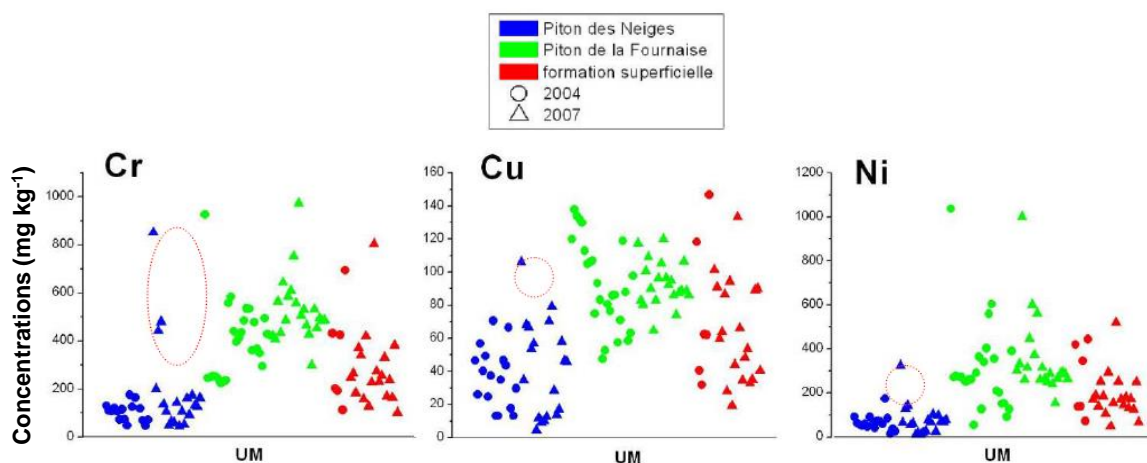


Figure 2. Comparaison des concentrations totales en Cr (à gauche), en Cu (au milieu), et en Ni (à droite) dans les sols de l'inventaire fait en 2004 à l'échelle de La Réunion (cercles ; Doelsch et al. 2006) avec les concentrations dans les sols de l'étude milieu faite en 2007 (triangles ; Collin et Doelsch 2008) issus des matériaux volcaniques du Piton des Neiges (en bleu), du Piton de la Fournaise (en vert), ou des formations géologiques superficielles (en rouge)

Les concentrations en Cr, Cu, et Ni dans les extraits de sol au CaCl_2 ont toutes été inférieures aux seuils proposés dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005), à l'exception d'un échantillon pour Ni qui a été jugé comme non représentatif. La mobilité de Cr, Cu, et Ni a donc été jugé comme faible, y compris dans les sols présentant des concentrations totales supérieures aux seuils réglementaires fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998. Les concentrations en Cr, Cu, et Ni dans les extraits de sol au NH_4NO_3 ont été inférieures aux seuils proposés dans le guide technique pour les 59 échantillons étudiés. La phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni a donc été jugé comme faible, y compris dans les sols présentant des concentrations totales supérieures aux seuils réglementaires fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998.

Les concentrations en Cr, Cu, et Ni dans le jus et la bagasse des cannes à sucre prélevées sur 50 points d'échantillonnage de sol se sont avérées être équivalentes aux concentrations retrouvées dans la littérature scientifique et non différentes entre les cannes ayant poussées sur des sols présentant des concentrations totales inférieures ou supérieures aux seuils réglementaires fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 (Figure 3).

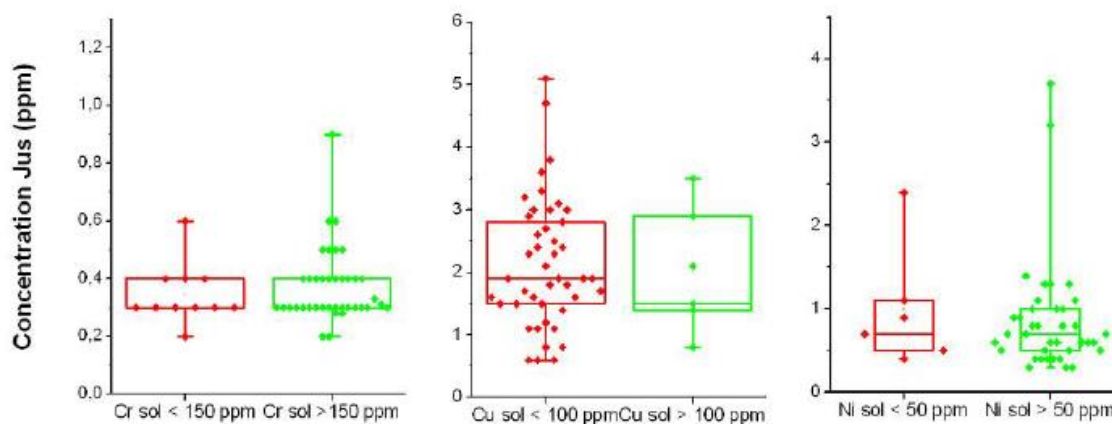


Figure 3. Concentrations en Cr (à gauche), en Cu (au milieu), et en Ni (à droite) dans le jus de cannes à sucre récoltées sur des sols présentant des concentrations totales en Cr, Cu, et Ni inférieures (en rouge) ou supérieures (en vert) au seuil de l'arrêté du 8 janvier 1998 (d'après Collin et Doelsch 2008)

2.3. Conclusions

Les résultats de l'étude de Collin et Doelsch (2008), rappelés brièvement ci-dessus, ont permis l'obtention de dérogations pour l'épandage des boues sur l'ensemble des sols de l'île de La Réunion présentant des concentrations en Cr, Cu, et Ni supérieures aux seuils réglementaires fixés dans l'arrêté du 8 janvier 1998. Mais, **plusieurs limites peuvent être soulignées quant à l'application directe de cette étude à l'ensemble de l'île dans le cadre de l'arrêté du 25 juin 2014.**

D'une part, **la représentativité des UM étudiées dans l'étude de Collin et Doelsch (2008) par rapport à l'ensemble de l'île reste incomplète.** Cette représentativité partielle concerne :

- les propriétés physiques et physico-chimiques des sols des 76 UM non étudiées par Collin et Doelsch (2008) ;
- les concentrations totales, la mobilité, et la phytodisponibilité des ETM des sols des 76 UM non étudiées par Collin et Doelsch (2008).

D'autre part, le cahier des charges pour la demande de dérogation au critère ETM impose le recours à une étude de terrain de la phytodisponibilité des ETM pour Cr et Cu ainsi que pour les sols dont la concentration en Ni dépasse 70 mg kg^{-1} . L'étude de terrain de la phytodisponibilité des ETM est donc indispensable à La Réunion. De ce fait, **les conclusions qui ont été obtenues dans le cadre de l'étude de Collin et Doelsch (2008) et qui ont portées sur le terrain uniquement sur la canne à sucre ne sont pas directement extensibles aux autres cultures et aux espaces verts.**

Ainsi, **des informations complémentaires doivent être apportées afin d'étendre les conclusions de l'étude de Collin et Doelsch (2008)** à l'ensemble des sols, des cultures, et espaces verts sur lesquels la Reuse est susceptible d'être mise en œuvre à La Réunion.

3. DONNEES COMPLEMENTAIRES POUR L'EXTENSION DE LA DEROGATION A L'ENSEMBLE DES SOLS DE LA REUNION

Cette partie a pour objectif de présenter un ensemble de données complémentaires à l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008), de manière à pouvoir vérifier la représentativité des conclusions de cette étude de milieu en ce qui concerne les gammes de concentrations totales, la mobilité et la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni pour l'ensemble des sols de La Réunion.

3.1. Représentativité des gammes de concentrations totales en ETM dans les sols

La représentativité pour l'ensemble des sols de La Réunion des gammes de concentrations totales en ETM observées dans l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) peut être évaluée à partir de deux inventaires réalisés sur l'ensemble de La Réunion par le Cirad (Doelsch et al. 2006) et le BRGM (Laperche et al. 2008) et complétés par un inventaire ciblé sur les sols issus du Piton de la Fournaise (Doelsch et al. 2010) (Figure 4). Ces données basées sur 188 points d'échantillonnage complètent l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) en couvrant 43 UM supplémentaires.

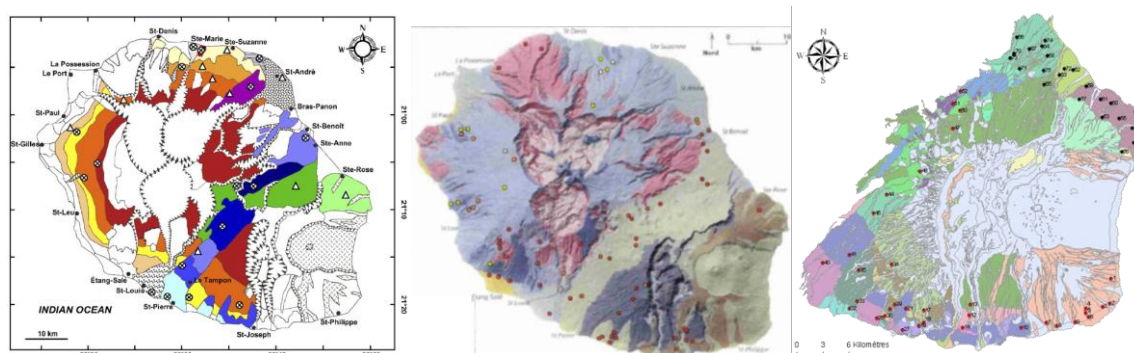


Figure 4. Localisation des points d'échantillonnage pour les inventaires des concentrations totales en ETM dans les sols réalisés par le Cirad en 2004 (à gauche ; Doelsch et al. 2006) et en 2010 (à droite ; Doelsch et al. 2010) ainsi que par le BRGM en 2008 (au milieu ; Laperche et al. 2008)

Les gammes et la distribution des concentrations totales en Cr, Cu, et Ni dans les sols échantillonnés dans l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) sont très similaires à celles obtenues pour les sols de ces trois inventaires complémentaires (Figure 5). Ce résultat suggère donc que les concentrations totales en Cr, Cu, et Ni mesurées dans l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) sont bien représentatives de l'ensemble des sols de La Réunion.

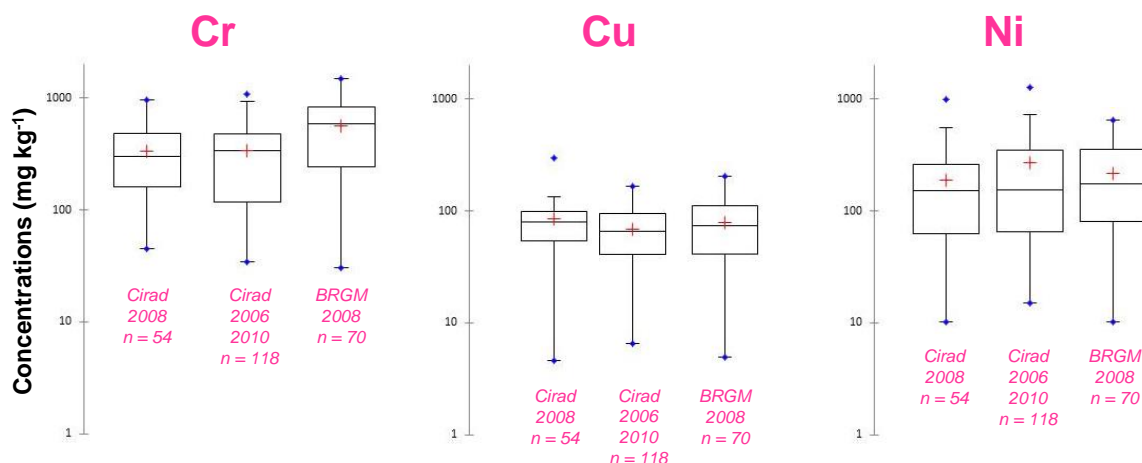


Figure 5. Gammas de concentrations totales en Cr, Cu, et Ni dans les sols de La Réunion obtenues dans le cadre de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008 ; à gauche pour chaque ETM), des inventaires réalisés par le Cirad en 2004 et 2010 (Doelsch et al. 2006 ; Doelsch et al. 2010 ; au milieu pour chaque ETM) et de l'inventaire réalisé par le BRGM (Laperche et al. 2008 ; à droite pour chaque ETM). Les limites des boîtes à moustaches représentent les premiers et troisièmes quartiles. Le trait horizontal et la croix représentent respectivement la médiane et la moyenne. Les barres verticales représentent les limites inférieures et supérieures⁴. Les losanges bleus représentent les valeurs minimums et maximums.

3.2. Données complémentaires sur les ETM répondant au cadre dérogatoire

L'inventaire de 2010 portant sur 34 points d'échantillonnage uniquement localisés sur des sols issus du Piton de la Fournaise (Doelsch et al. 2010) a permis l'obtention de données sur les concentrations totales, la mobilité et la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni selon la méthodologie proposée dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005).

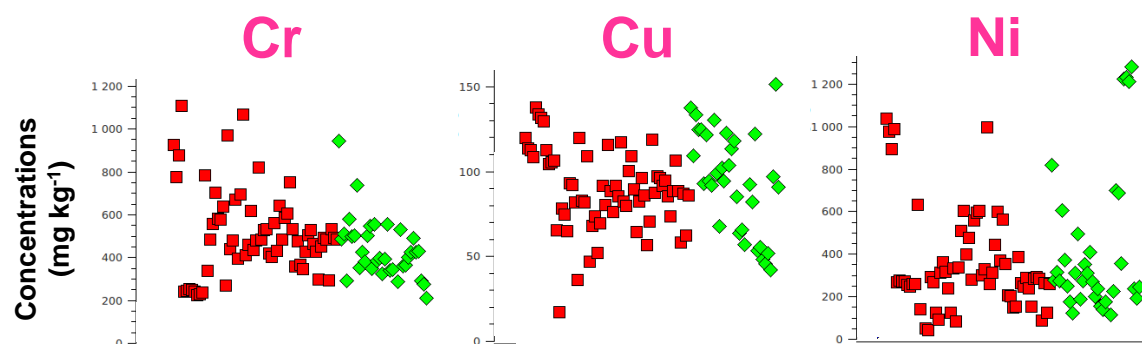


Figure 6. Comparaison des gammas de concentrations totales en Cr, Cu, et Ni des sols issus du Piton de la Fournaise obtenues dans le cadre de l'inventaire de 2004 (Doelsch et al. 2006) et l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) (symboles rouges) et dans le cadre de l'inventaire de 2010 (Doelsch et al. 2010 ; symboles verts)

⁴ Les limites inférieures (x) et supérieures (y) sont calculées pour chaque série de données telles que :
 $\{x - [Q1 - 1,5 (Q3 - Q1)]\}$ soit au moins minimal et $x = Q1 - 1,5 (Q3 - Q1)$
 $\{y - [Q3 + 1,5 (Q3 - Q1)]\}$ soit au plus maximal et $y = Q3 + 1,5 (Q3 - Q1)$

La similitude des gammes de concentrations totales en Cr, Cu, et Ni des sols de l'inventaire de 2010 avec les gammes de concentrations obtenues pour les sols de l'inventaire de 2004 (Doelsch et al. 2006) a permis de confirmer l'origine naturelle des concentrations totales en Cr, Cu, et Ni dans les sols de l'inventaire de 2010 (Figure 6).

Les concentrations en Cr et Cu mesurées dans les extraits au CaCl_2 des sols de l'inventaire de 2010 ont toutes été inférieures aux seuils proposés dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005), démontrant ainsi la faible mobilité de Cr et Cu dans ces sols. En revanche, les concentrations en Ni dans les extraits au CaCl_2 ont été supérieures au seuil proposé de $20 \mu\text{g l}^{-1}$ dans le guide technique pour 7 échantillons de sol sur 34, dont 4 échantillons pour lesquels des concentrations 2 à 5 fois supérieures au seuil (43 à $113 \mu\text{g l}^{-1}$) ont été observées. La mobilité de Ni dans ces 4 échantillons de sol localisés sur les UM 28, 29, et 48 pourrait donc être jugée comme trop élevée pour qu'une dérogation puisse être accordée.

Les concentrations en Cr, Cu, et Ni mesurées dans les extraits au NH_4NO_3 des sols de l'inventaire de 2010 ont toutes été inférieures aux seuils proposés dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005), à l'exception d'un échantillon de sol prélevé sur l'UM 28 pour lequel la concentration en Ni ($1,8 \text{ mg kg}^{-1}$) a été légèrement supérieure au seuil proposé de $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Etant donné que cet échantillon de sol provenant de l'UM 28 avait déjà présenté la concentration en Ni dans l'extrait CaCl_2 la plus élevée et supérieure au seuil proposé, la phytodisponibilité de Ni pour cet échantillon pourrait être jugée comme trop forte pour qu'une dérogation puisse être accordée. Il doit être noté qu'aucune analyse de plantes prélevées sur le terrain n'a été réalisée sur cet inventaire de 2010 pour compléter les données sur les sols.

3.3. Données complémentaires sur les ETM hors du cadre dérogatoire

Doelsch et al. (2008) ont déterminé la concentration de Cr, Cu, et Ni dans les extraits au NaNO_3 ⁵ de 4 sols comprenant un nitisol de Sainte-Marie (UM 16) représentatif des sols des bas du Nord, un andosol de Sainte-Rose (UM 49-50) représentatif des sols de mi-pente de l'Est, un cambisol de Saint-Pierre (UM 28-29) représentatif des sols des bas du Sud, et un cambisol des Colimaçons (UM 32-33) représentatif des sols de mi-pente de l'Ouest. Si la méthodologie suivie ne respecte

⁵ Cette méthode d'extraction a été mise au point pour extraire la fraction échangeable des ETM du sol, c'est-à-dire la fraction qui peut facilement se désorber de la phase solide pour passer en solution. Cette méthode d'extraction se rapproche conceptuellement de la méthode d'extraction au NH_4NO_3 qui est proposée comme méthode d'évaluation de la phytodisponibilité des ETM dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005).

pas rigoureusement celle proposée dans le guide technique pour la formulation d'une demande de dérogation (Ademe et APCA 2005), ces données complémentaires doivent notamment permettre de vérifier si la disponibilité des ETM du cambisol de Saint-Pierre situé sur l'UM 28-29 est supérieure à celle des autres sols étudiés.

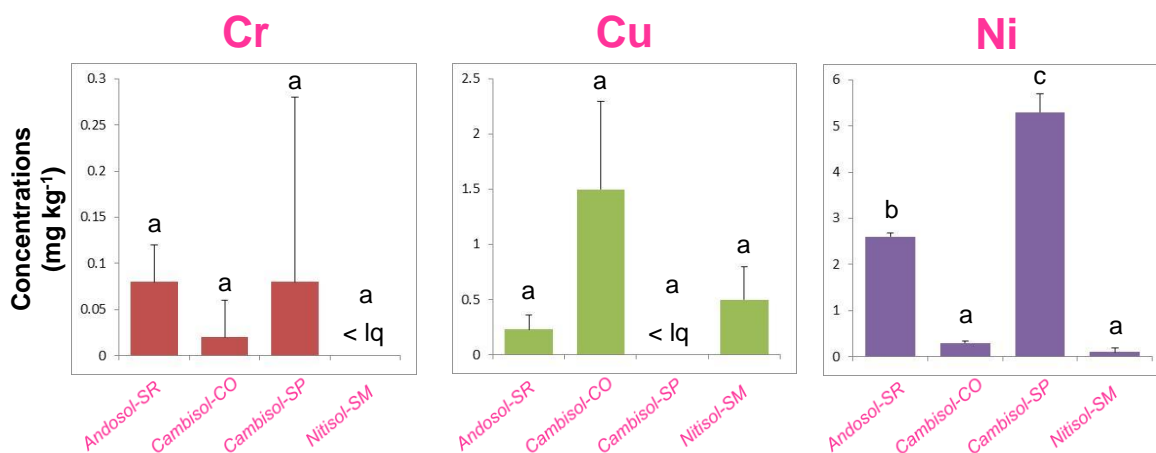


Figure 7. Comparaison des concentrations de Cr, Cu, et Ni échangeables (extrait avec NaNO_3 0,1 M) dans quatre sols de La Réunion : un andosol de Sainte-Rose (Andosol-SR), un cambisol andique des Colimaçons (Cambisol-CO), un cambisol de Saint-Pierre (Cambisol-SP) et un nitisol de Sainte-Marie (Nitisol-SM) (d'après Doelsch et al. 2008). Les barres d'erreur représentent les écarts-types ($n = 3$). < lq signifie « valeurs inférieures à la limite de quantification » (approximativement $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$). Des lettres différentes entre les différents sols pour un ETM représentent une différence significative à $p \leq 0,001$ (test HSD de Tuckey).

Les concentrations en Cr et Cu mesurées dans les extraits au NaNO_3 du cambisol de Saint-Pierre sont similaires, voire inférieures, aux concentrations mesurées pour les trois autres sols étudiés (Figure 7). En revanche, la concentration en Ni mesurée dans l'extrait au NaNO_3 du cambisol de Saint-Pierre s'est avérée significativement supérieure aux concentrations mesurées pour les trois autres sols étudiés. Ces résultats confortent donc les résultats de l'inventaire de 2010 qui suggéraient une mobilité et une phytodisponibilité de Ni dans les sols des UM 28 et 29 trop élevée pour qu'une dérogation puisse être accordée.

Les résultats qui précèdent suggèrent qu'une dérogation ne devrait pas être accordée pour les sols situés sur les UM 28, 29 et 48. L'évaluation de l'étendue de ces UM à l'échelle de La Réunion est donc primordiale afin d'estimer l'importance des surfaces concernées par cette possible restriction de dérogation. Si l'UM 48 est confinée aux sols issus du Piton de la Fournaise, les UM 28 et 29 s'étendent d'après la carte de Raunet (1991) de l'Ouest (La Possession) au Sud de l'île (Saint-Joseph) et concernent à la fois des sols issus du Piton des Neiges et du piton de la Fournaise (Figure 4). Doelsch et al. (2006) ont étudié deux profils de sol appartenant aux UM 28-29, l'un localisé sur la zone du Piton des Neiges (Saint-Gilles les Hauts), l'autre localisé sur la zone

du Piton de la Fournaise (Bassin Plat). La comparaison des concentrations totales en Cr, Cu, et Ni montrent que celles du sol de Bassin Plat sont très supérieures (930, 120, et 1040 mg kg⁻¹, respectivement) à celles du sol de Saint-Gilles les Hauts (74, 25, et 47 mg kg⁻¹, respectivement). Ces deux sols sont certainement similaires du point de vue de leur pédogenèse, ce qui a conduit Raunet (1991) à les classer dans une même UM alors que leurs matériaux parentaux étaient différents. Ils sont en revanche très différents du point de vue de leur concentration totale en Cr, Cu, et Ni. Cette différence de concentrations est cohérente avec les différences de concentrations en Cr, Cu, et Ni généralement observée entre les sols issus du Piton de la Fournaise et ceux issus du Piton des Neiges. Ainsi, ce résultat suggère que la restriction de dérogation pourrait ne porter que sur les sols des UM 28 et 29 issus du Piton de la Fournaise.

3.4. Etat des lieux pour les 33 unités de milieu non étudiées

Les données sur les ETM présentées dans les sous-parties 3.1 à 3.3 permettent en complément de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) de statuer sur la concentration totale, la mobilité et la phytodisponibilité des ETM dans les sols de 60 des 93 UM que compte La Réunion. Il reste donc 33 UM pour lesquelles aucune donnée sur les ETM n'a été acquise à notre connaissance. Malgré ce déficit d'information, la localisation et la nature géo-morpho-pédologique de ces 33 UM ont été étudiées afin de pouvoir s'exprimer sur la possibilité de demander une dérogation ETM pour ces 33 UM.

Les 33 UM ont été rassemblées en 8 groupes intrinsèquement homogènes (Annexe 1). Chaque groupe a ensuite été analysé selon trois critères permettant d'estimer le risque d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols :

- la présence de surfaces agricoles en lien avec la localisation des UM (altitude) et la présence ou non de sol (substratum géologique affleurant) ;
- l'intérêt que représente le développement de la Reuse sur l'UM concernée en lien avec la localisation des UM (zones humides ou sèches) ;
- l'origine géologique du matériau parental des sols en lien avec le fait que seuls les sols de certaines UM localisées sur le massif du Piton de la Fournaise ont présenté à la fois une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée de certains ETM.

Tableau 1. Estimation du risque d'avoir une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols des 33 unités de milieu pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sur les ETM.

Unités de milieu	Critères	Présence de surfaces agricoles ^a	Intérêt de la Reuse ^a	Origine géologique du matériau parental ^b	Risque estimé
1 et 3		Ø	Ø	2	nul
10 à 12		+	++	PdN	faible
21 à 23, 25 et 26		+	++	PdN	faible
27		+/-	++	PdN	faible
38 à 40		+/-	-	PdN	nul à faible
61, 65 à 67		Ø, sauf 65	Ø, sauf 65	PdF	nul sauf 65
69, 71, 73 à 79		+/-	+/-	2	nul à faible
81, 84, 88, 89, 91 et 92		+	+	PdN sauf 84	faible sauf 84

^a Ø = absence de surfaces agricoles ou sans intérêt pour la Reuse (zones très humides) ; - = Intérêt faible pour la Reuse ; +/- = Peu de surfaces agricoles présentes ou intérêt modéré pour la Reuse ; + = Présence importante de surfaces agricoles ou intérêt potentiellement fort pour la Reuse ; ++ = Très fort intérêt pour la Reuse

^b Piton des Neiges (PdN), Piton de la Fournaise (PdF), ou les deux (2)

L'analyse des 33 UM selon ces trois critères montre que le risque d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols de 31 UM serait nul à faible (Tableau 1). Il n'est en revanche pas possible d'exclure un risque potentiel d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols des UM 65 et 84. Même si les surfaces potentiellement à risque sont très peu concernées par des activités agricoles (UM 65 ; Figure 8) ou très peu étendues (UM 84 ; Figure A.8), les UM 65 et 84 sont en partie localisée dans les bas sur le massif du Piton de la Fournaise.

**Figure 8.** Localisation de l'unité de milieu 65 (en vert) et des surfaces de sol occupées par l'agriculture (en violet).

3.5. Conclusions

Les UM caractérisées par Collin et Doelsch (2008) ne concernent que 17 des 90 UM de La Réunion. Cependant, **plusieurs jeux de données complémentaires montrent que les UM de l'étude de Collin et Doelsch (2008) sont représentatives de 60 des 93 UM de La Réunion en matière de concentrations totales en ETM.**

Pour ce qui concerne les critères de mobilité et de phytodisponibilité des ETM évalués par extractions chimiques sur des échantillons de sol, les études de Doelsch et al. (2008, 2010) ont montré que les conclusions de l'étude de Collin et Doelsch (2008) étaient au moins extensibles aux 60 UM étudiées à La Réunion, à l'exception des UM 28, 29, et 48 pour lesquelles des concentrations dépassant les seuils fixés dans le cahier des charges pour la demande de dérogation au critère ETM ont été observées.

L'inventaire de Doelsch et al. (2006) suggère par ailleurs que les sols des UM 28 et 29 issus du Piton des Neiges sont beaucoup moins riches en Cr, Cu, et Ni que les sols des UM 28 et 29 issus du Piton de la Fournaise. Ainsi, **la restriction de dérogation pourrait ne concerner que les sols des UM 28 et 29 issus du Piton de la Fournaise.**

Pour ce qui concerne les 33 UM pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sur les ETM, l'analyse de leur localisation et leur nature géo-morpho-pédologique a permis d'estimer que 31 de ces 33 UM présentaient un risque nul à faible d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols. Il n'est en revanche pas possible d'exclure un risque potentiel d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols des UM 65 et 84.

4. DONNEES COMPLEMENTAIRES POUR L'EXTENSION DE LA DEROGATION A L'ENSEMBLE DES CULTURES ET ESPACES VERTS A LA REUNION

Cette partie a pour objectif de présenter un ensemble de données complémentaires à l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) sur les concentrations en Cr, Cu, et Ni dans des plantes autres que la canne à sucre, de manière à pouvoir soutenir une demande de dérogation valable pour l'ensemble des cultures et des espaces verts à la Réunion.

4.1. Données complémentaires concernant les espaces verts

Des analyses de concentration en Cr, Cu, et Ni ont été réalisées dans des plantes herbacées, des feuillus et des palmiers préalablement nettoyés issus de déchets verts provenant des stations de compostage du Port, de Sainte-Rose et de Saint-Pierre (Figure 8). Si ces analyses ne peuvent pas être directement reliées à un type de sol sur lequel auraient poussé ces végétaux, l'origine des végétaux qui approvisionnent ces trois stations permettent malgré tout d'évaluer l'effet du type de sol et de son niveau de concentration en Cr, Cu, et Ni sur les concentrations retrouvées dans les végétaux constitutifs des déchets verts. En effet, les stations de Sainte-Rose et de Saint-Pierre sont notamment approvisionnées par des déchets verts constitués de végétaux ayant poussé sur de sols issus du Piton de la Fournaise et donc probablement riche en Cr, Cu, et Ni. A l'inverse, la station du Port est exclusivement approvisionnée par des déchets verts constitués de végétaux ayant poussé sur de sols issus du Piton des Neiges et donc probablement moins riche en Cr, Cu, et Ni.

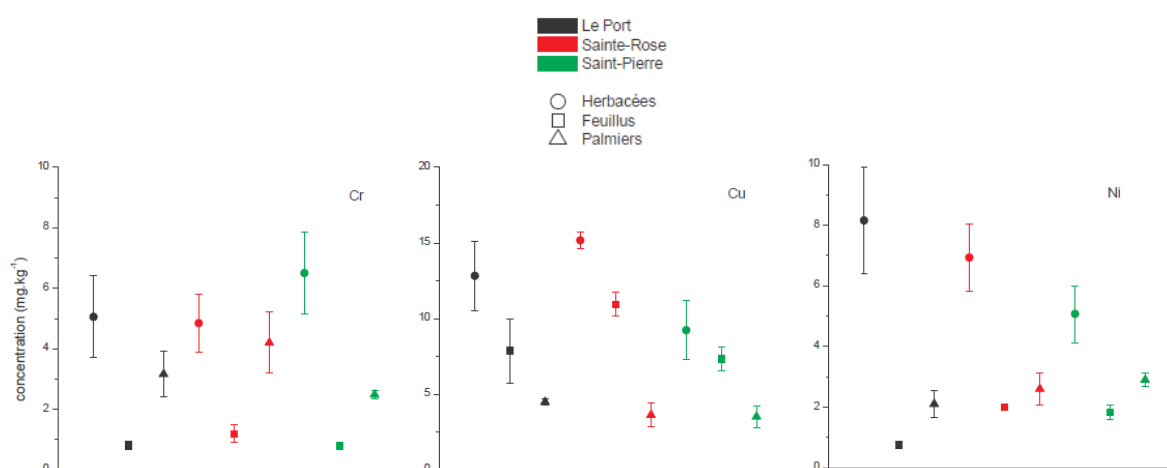


Figure 9. Concentrations totales en Cr, Cu, et Ni mesurées dans les parties aériennes nettoyées de plantes herbacées (cercles), de feuillus (carrés), et de palmiers (triangles) issus de déchets verts produits sur les stations du Port (symboles noirs), de Sainte-Rose (symboles rouges) et de Saint-Pierre (symboles vert). Les barres d'erreur représentent les écarts-types ($n = 3$) (d'après Payet et al. 2008).

Si les concentrations en Cr, Cu, et Ni sont différentes suivant le type de végétaux, ces concentrations ne semblent pas déterminées par leur origine géographique (Figure 8). Ainsi, la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni pour les végétaux des espaces verts ne semble pas plus élevée lorsque les végétaux ont poussé sur des sols riches en Cr, Cu, et Ni.

4.2. Données complémentaires concernant les plantes maraîchères et arboricoles

Les concentrations en Cr, Cu, et Ni ont été déterminées dans 13 échantillons de salades (1 prélèvement effectué à Dos D'Âne et 12 prélèvements effectués sur une essai de fertilisation à Saint-Denis), de carottes (1 prélèvement effectué au Tampon) et de clémentines (1 prélèvement effectué à la Chapelle Pointue) cultivées sur des sols présentant des concentrations en Cr, Cu, et Ni dans le sol inférieures ou supérieures aux seuils fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 (Figure 9).

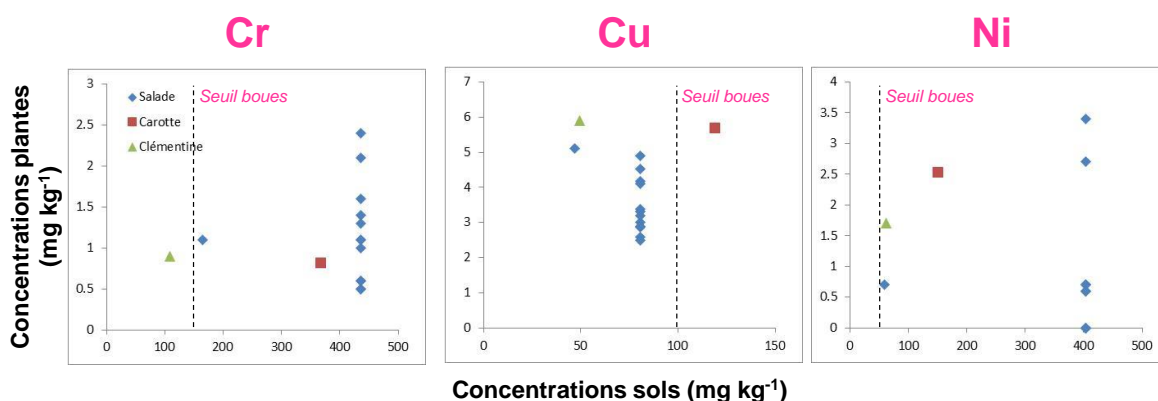


Figure 10. Concentrations en Cr, Cu, et Ni mesurées dans des salades, des carottes et des clémentines en fonction des concentrations en Cr, Cu, et Ni mesurées dans les sols. Les droites tiretées représentent les seuils définis pour chaque élément par l'arrêté du 8 janvier 1998 (d'après Doelsch 2004).

Les concentrations en Cr, Cu et Ni mesurées dans les salades, les carottes, et les clémentines n'ont pas été reliées aux concentrations totales de Cr, Cu, et Ni dans les sols (Figure 9). Les concentrations en Cr et Cu mesurées dans les salades, les carottes, et les clémentines ayant poussé sur des sols dépassant les seuils fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 n'ont pas été supérieures aux concentrations mesurées dans les plantes ayant poussées sur des sols ne dépassant pas les seuils. Ainsi, ces résultats suggèrent que la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni pour les plantes maraîchères et arboricoles ne serait pas plus élevée lorsque les végétaux ont poussé sur des sols riches en Cr, Cu, et Ni.

4.3. Données complémentaires concernant les plantes prairiales

Les concentrations en Cr, Cu, et Ni ont été déterminés dans quelques échantillons de plantes prairiales (kikuyu et ray-grass) cultivées sur des sols issus du Piton de la Fournaise (Plaines des Palmistes et des Cafres) présentant des concentrations en Cr, Cu, et Ni dans le sol inférieures ou supérieures aux seuils fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 (Figure 10).

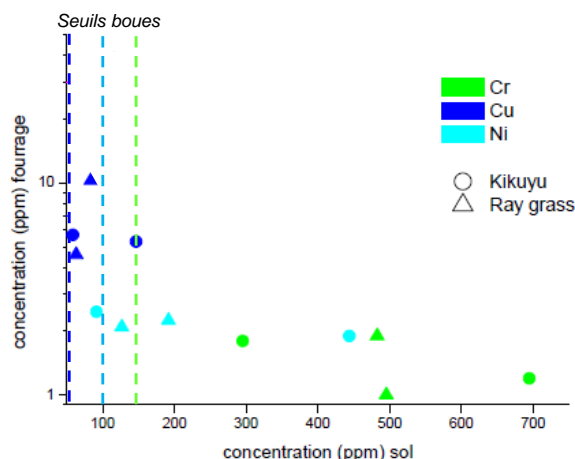


Figure 11. Concentrations en Cr, Cu, et Ni mesurées dans les parties aériennes de kikuyu et de ray-grass en fonction des concentrations en Cr, Cu, et Ni mesurées dans les sols. Les droites tiretées représentent les seuils définis pour chaque élément par l'arrêté du 8 janvier 1998 (d'après Doelsch 2004).

Les concentrations en Cr, Cu et Ni mesurées dans les plantes prairiales n'ont pas été reliées aux concentrations totales de Cr, Cu, et Ni dans les sols (Figure 10). Les concentrations en Cu mesurées dans les plantes ayant poussé sur des sols dépassant le seuil fixé par l'arrêté du 8 janvier 1998 n'ont pas été supérieures aux concentrations mesurées dans les plantes ayant poussées sur des sols ne dépassant pas ce seuil. Ainsi, ces résultats suggèrent que la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni pour les plantes maraîchères et arboricoles ne serait pas plus élevée lorsque les végétaux ont poussé sur des sols riches en Cr, Cu, et Ni.

4.4. Conclusions

Les données complémentaires à l'étude de Collin et Doelsch (2008) obtenues à partir de mesures de Cr, Cu, et Ni sur des végétaux issus de déchets verts, sur deux cultures maraîchères, sur une espèce arboricole ainsi que sur deux espèces prairiales cultivées sur différentes zones de La Réunion n'indiquent ni de différence de concentrations entre ces différentes zones (végétaux issus de déchets verts) ni de différences de concentrations entre les végétaux cultivés sur des sols présentant des concentrations en ETM supérieures ou inférieures aux seuils définis par l'arrêté du 8 janvier 1998 (espèces maraîchères, arboricole et prairiales).

Bien que relativement peu nombreuses, **ces données complètent les données de l'étude de Collin et Doelsch (2008) et en confortent les conclusions pour d'autres cultures. Ces données participent ainsi à la formulation d'un avis favorable à l'extension de la dérogation à l'ensemble des cultures et espaces verts.** Les principaux besoins en matière d'irrigation portent en effet sur les espaces verts et des parcelles cannières.

5. CONCLUSION GENERALE

Si **l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008)** a permis l'obtention de dérogations pour l'épandage des boues sur l'ensemble des sols de La Réunion présentant des concentrations en Cr, Cu, et Ni supérieures aux seuils fixés dans l'arrêté du 8 janvier 1998, elle **présente deux limites principales** :

- la représentativité des 17 UM étudiées par rapport aux 93 UM recensées à La Réunion n'est pas complètement validée pour ce qui concerne les gammes de concentrations totales, la mobilité et la phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni dans les sols ;
- les conclusions quant à la faible phytodisponibilité de Cr, Cu, et Ni mesurée sur la canne à sucre ne sont pas rigoureusement extensibles aux autres cultures et aux espaces verts sur lesquels la Reuse est susceptible d'être mise en œuvre à La Réunion.

Des données supplémentaires ont donc été extraites de travaux réalisés sur cette problématique à La Réunion et analysées dans le contexte de la demande de dérogation sur le critère ETM afin de compléter les données de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008).

L'analyse des gammes de concentrations totales en Cr, Cu, et Ni obtenues dans trois inventaires couvrant 43 UM supplémentaires à celles de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) a montré que les UM de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) étaient représentatives de 60 des 93 UM de La Réunion en matière de concentrations totales des sols en ETM. De plus, deux jeux de données complémentaires (Doelsch et al. 2008 et 2010) ont permis de montrer que les conclusions de l'étude de milieu de Collin et Doelsch (2008) étaient également au moins extensibles à 60 des 93 UM de La Réunion, à l'exception des UM 28, 29, et 48, en matière de mobilité et de phytodisponibilité des ETM évaluées par extractions chimiques sur des échantillons de sol. L'analyse des données de l'inventaire de 2004 (Doelsch et al. 2006) a enfin suggéré que l'exception concernant les UM 28, 29, et 48 ne devrait s'appliquer qu'aux sols issus du Piton de la Fournaise qui présentent pour ces trois UM des concentrations totales beaucoup plus élevées que les sols issus du Piton des Neiges. Pour ce qui concerne les 33 UM pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sur les ETM, l'analyse de leur localisation et leur nature géo-morpho-pédologique a permis d'estimer que ces 33 UM présentaient un risque nul à faible d'observer une concentration, une mobilité et une phytodisponibilité élevée des ETM dans les sols, à l'exception des UM 65 et 84 pour lesquelles un risque potentiellement élevé ne peut être exclu.

L'analyse des données complémentaires provenant de mesures de concentration en Cr, Cu, et Ni dans des végétaux issus de déchets verts (représentatifs des espaces verts), dans des plantes maraîchères et arboricoles, ainsi que dans des espèces prairiales conforte les conclusions faites par Collin et Doelsch (2008) sur la canne à sucre, en ne montrant aucune différence de concentrations pour des plantes ayant été cultivées sur des sols présentant des concentrations en ETM inférieures ou supérieures aux seuils définis par l'arrêté du 8 janvier 1998.

Considérés dans leur ensemble, les résultats de ce rapport de synthèse suggèrent donc que les conclusions formulées par Collin et Doelsch (2008) seraient effectivement extensibles à l'ensemble des sols, des cultures, et des espaces verts sur lesquels la Reuse serait susceptible d'être mise en œuvre à La Réunion, à l'exception des sols des UM 28, 29, 48, 65, et 84 issus du Piton de la Fournaise pour lesquels une incertitude subsiste quant à la mobilité et la phytodisponibilité des ETM (Ni en particulier).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Ademe et APCA (2005)** Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ? Guide technique. Béraud J. et Bispo A. (Coordinateurs). Baize D., Sterckeman T., Piquet A., Ciesielski H., Béraud J. et Bispo A. (Auteurs).
- Arrêté du 8 janvier 1998** fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. NOR : ATEE9760538A.
- Arrêté du 2 août 2010** relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. NOR : SASP1013629A.
- Arrêté du 25 juin 2014** modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. NOR : AFSP1410752A.
- Arrêté préfectoral du 15 mars 2013** portant prescriptions spécifiques à déclaration au titre de l'article L 214-3 du code de l'environnement concernant l'opération « Valorisation agricole des boues issues des stations d'épuration de Saint-Pierre et de l'Entre-Deux ». N°2013 – 381/SG/GDRCTCV.
- Arrêté préfectoral du 27 février 2014** portant autorisation au titre de l'article L 214-3 du code de l'environnement de l'opération de « Valorisation par épandage agricole des boues des stations d'épuration du Grand Prado et des Trois Frères ». N°14 – 2919/SG/DRCTCV.
- Collin B. et Doelsch E. (2008)** Evaluation de la mobilité et de la phytodisponibilité des éléments traces métalliques des sols – Etude réalisée sur les sols de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST), en perspective d'une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Office de l'Eau Réunion, DAAF Réunion et Cirad, 60 p.
- Doelsch E. (2004)** Eléments traces métalliques : inventaire pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux). Rapport du Cirad et de la chambre d'agriculture de La Réunion, 125 p.
- Doelsch E., van de Kerchove V. et Saint Macary H. (2006)** Heavy metal content in soils of Réunion (Indian Ocean). Geoderma, 134, 119-134.
- Doelsch E., Géraud M. et Saint Macary H. (2008)** Fractionation of tropical soilborne heavy metals – Comparison of two sequential extraction procedures. Geoderma, 143, 168-179.

- Doelsch E., Moussard G., Chevassus-Rosset C., Saint Macary H., Famin V., Lebeau G. et Basile-Doelsch I. (2010)** Les Eléments Traces Métalliques naturels sont-ils un facteur limitant pour l'épandage agricole sur les sols du Piton de la Fournaise ? Fiche n°3.2, projet REAVOLC, 17 p.
- Elofer E. (2015)** Etat des lieux des projets de réutilisation des eaux usées traitées à la Réunion et définition de ratios technico-économiques de faisabilité d'un projet de REUSE. Office de l'eau (coord.), Université de Montpellier, 66 p.
- Laperche V., Lucas E. et Nehlig P. (2008)** Cartographie des teneurs des éléments traces métalliques (ETM) sur l'ensemble des sols de l'île de La Réunion. Rapport final, BRGM/RP-56576-RF.
- Payet N., van de Kerchove V., Doelsch E. et Moussard G. (2008)** Composts de déchets verts urbains réunionnais : origine des concentrations élevées en élément traces métalliques (ETM). Rapport de la chambre d'agriculture de La Réunion et du Cirad, 24 p.
- Raunet M. (1991)** Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD IRAT, Montpellier. 438 p.

7. ANNEXE 1 : LOCALISATION ET NATURE DES 33 UNITES DE MILIEU POUR LESQUELLES AUCUNE DONNEE N'EST DISPONIBLE SUR LES ETM

L'analyse de la carte pédologique de Raunet (1991) a permis de regrouper les 33 UM pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sur les ETM en 8 groupes dont la localisation et la nature geo-morpho-pédologique sont précisées ci-dessous.

7.1. Unités de milieu 1 et 3

Dans la série des UM de haute altitude (UM 1 à 4), les UM 1 et 3 correspondent aux milieux situés au-dessus de 2 500 mètres d'altitude (UM 1) et à des planèzes situées entre 1 800 et 2 500 mètres d'altitude (UM 3).



Figure A.1. Localisation des unités de milieu 1 et 3.

7.2. Unités de milieu 10 à 12

Les UM 10 à 12 correspondent aux sols développés sur les tufs de Saint-Gilles : de faible étendue (850 hectares), l'ensemble forme des reliefs de hautes collines, entre le Cap La Houssaye et Saint-Gilles-Les-Bains. Les versants et les convexités sommitales sont couverts d'une savane herbeuse sèche. En contrebas du Piton des Aigrettes, présence de vergers irrigués, bénéficiant d'arrivées d'eau à partir de canaux branchés dans la Ravine Saint-Gilles. La pluviométrie est très faible,

comprise entre 550 et 700 mm selon l'altitude et la saison sèche est très longue : 7 mois avec moins de 50 mm par mois.



Figure A.2. Localisation des unités de milieu 10 à 12.

7.3. Unités de milieu 21 à 23, 25 et 26

Les UM 21 à 23 correspondent à des sols bruns ferruginisés sur des coulées de la phase IV du piton des Neiges. Les classes de pentes permettent de différencier ces trois UM :

- les pentes modérées, comprises entre 10 et 20 % (UM 21) ;
- les pentes fortes, comprises entre 20 et 30 % (UM 22) ;
- les pentes très fortes, supérieures à 30 % (UM 23).

Les UM 25 et 26 correspondent à des vertisols et à des affleurements de coulées. Les types de milieu à pédogenèse verticale caractérisent, sur environ 1 000 hectares (entre La Possession et Les Avirons), les secteurs à faibles pentes (en dessous de 10 %) du littoral.



Figure A.3. Localisation des unités de milieu 21 à 23 (à gauche) et 25 et 26 (à droite).

Les UM 21 à 23, 25 et 26 sont développées sur le même type de roches mère. Ce sont essentiellement des mugéarites, c'est-à-dire des andésites alcalines assez claires, riches en silice (50 à 52 % SiO_2), assez pauvres en magnésium (4 % MgO) et en calcium (7 % CaO).

7.4. Unité de milieu 27

L'UM 27 est localisée sur des tufs de la phase V (terminale) du piton des Neiges. Des sols bruns squelettiques (très peu épais) reposent sur ces tufs sub-affleurants résiduels qui forment quelques placages résiduels dans les zones sèches de l'ouest situés en dessous de 300 mètres d'altitude, entre la Possession et les Avirons. Ces placages de tufs jaunes ou de tufs ponceux noirâtres sont éparpillés en de multiples lambeaux allongés, souvent de moins de 1 hectare. Ces

pyroclastites de la phase V ont résisté à l'érosion et reposent sur les coulées des phases III ou IV, parfois sur les tufs de Saint-Gilles.



Figure A.4. Localisation de l'unité de milieu 27.

7.5. Unités de milieu 38 à 40

Les UM 38 à 40 correspondent à des andosols désaturés perhydratés et constitue un terme amont de la climato-séquence des UM 34 à 39. Au nord-est, zone la plus humide, se surajoute également, à partir de 1 300 mètres, une forte accumulation organique pseudo-tourbeuse appelée avoune.



Figure A.5. Localisation des unités de milieu 38 à 40.

7.6. Unités de milieu 61 et 65 à 67

L'UM 61 est constituée d'andosols vitriques mélaniques développés sur des lapilli de haute altitude. Son extension est très limitée. Les UM 65 à 67 correspondent à des coulées sub-actuelles et actuelles. Les sols sont quasiment inexistantes.



Figure A.6. Localisation des unités de milieu 61 et 65 à 67.

7.7. Unités de milieu 69, 71 et 73 à 79

Les UM 69, 71 et 73 à 79 concernent les régions affectées par la morpho-tectonique récente de grande ampleur : essentiellement les cirques (Cilaos, Mafate, Salazie, Rivière des Pluies) mais également les plaines effondrées ou glissées post-coulées (Tévelave, Entre-Deux, Grègues), les diverses masses glissées des grandes ravines (rivières des Roches, des Marsouins, du Bras de la Plaine, des Remparts, Langevin...) et des bas de remparts. Tous ces ensembles sont constitués de matériaux détritiques issus d'un démantèlement total des coulées (et de leurs recouvrements cendreaux).

Les caractères généraux communs à tous les sols qui se sont développés sur ces matériaux sont leur extrême charge caillouteuse et blocailleuse, ainsi que leur hétérogénéité spatiale à courte distance. Une matrice fine est toujours à l'origine riche en éléments vitreux (verre volcanique), à base d'un mélange de cendres, de tufs, de matériel scoriacé, de sables et de débris basaltiques en partie aphyrique. En condition de pédo-climat favorable, ce matériel vitreux finement divisé est apte à la pédogenèse andique avec néoformation de minéraux secondaires paracristallins allophaniques.

Spécifiquement, les types de sols suivants peuvent être caractérisés :

- sols bruns (UM 69) : altitude de 900 à 1 300 mètres, pluviométrie de 1 700 à 2 000 mm, 2 à 4 mois secs ;
- andosols désaturés non perhydratés (UM 73): altitude de 1 300 à 1 600 mètres, pluviométrie de 2 000 à 2 500 mm, 1 ou 2 mois secs ; à Salazie, les zones situées en dessous de 700 mètres d'altitude (Mare à Citrons, Mare à Poule d'Eau) peuvent se rattacher à cet ensemble ;
- les andosols désaturés perhydratés (UM 74 et 75) : pluviométrie supérieure à 2 500 mm et 0 ou 1 mois sec.



Figure A.7. Localisation des unités de milieu 69, 71 et 73 à 79.

7.8. Unités de milieu 81, 84, 88, 89, 91 et 92

L'UM 81 correspond à des alluvions anciennes c'est-à-dire à sols déjà bien évolués. L'UM 81 s'observe à l'aval de la Rivière des Pluies (Gillot), près de Saint-Benoît (en aval de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins), ainsi qu'à Savannah Grand Pourpier (Rivière des Galets).

L'UM 84 correspond à des alluvions actuelles. Ce sont les sables et galets des lits majeurs des cours d'eau. Sur les grands cônes de déjection, ils occupent une superficie non négligeable, environ 1 400 ha.

L'UM 88 correspond à la plaine d'ennoyage littorale de la Plaine de Saint-Paul (595 ha dont 400 ha en marais), liée au cône de la Rivière des Galets.

L'UM 89 correspond au vaste lahar pâteux et boursouflé, situé de part et d'autre du débouché de la rivière des Galets (environ 300 ha). Il forme une langue de 3 km de long, haute de 20 à 60 m. Ce modelé résulte de la progression rapide d'un matériau argileux riche en eau, mais non liquide. Le matériau de la coulée boueuse est constitué de débris rocheux anguleux (brèche) de nature pétrographique et taille hétérogènes (jusqu'à 1 m de large), emballés et faiblement soudés par une matrice argilo-sableuse gravillonnaire gris brunâtre clair (rappelant un tuf) assurant une certaine cohérence à l'ensemble. L'épaisseur du lahar serait de 50 à 100 m au-dessus d'un substratum de coulées de laves (mugéarites). La partie aval est enterrée sous le cône de déjection de la rivière des Galets. La mise en place a été brutale, probablement suite à la rupture d'un barrage de matériaux détritiques avant la phase de creusement du cirque de Mafate.

Les UM 91 et 92 correspondent à des cordons littoraux sableux bordent une partie du littoral ouest (sous le vent) depuis Saint-Paul jusqu'à l'Étang-Salé.



Figure A.8. Localisation des unités de milieu 81, 84, 88, 89, 91 et 92.